

## К ВОПРОСУ О ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НАГРЕВЕ ВОЗДУХА

Гильметдинова Ю.Р., Ляпустина К.А., Микула В.А., Вальцев Н.А.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

*Рассматривается рекуперативный нагрев воздуха до высоких, порядка 800–1000 °С температур и возможные способы интенсификации. Анализируется влияние на теплообмен изменения свойств воздуха в зависимости от давления. Оценивается теплотехнический аспект создания высокотемпературного воздухонагревателя по типу пылеугольного котла для гибридной угольной ПГУ.*

*Ключевые слова: воздух, рекуперативный нагрев, высокотемпературный воздухонагреватель, интенсификация теплообмена, гибридная схема ПГУ.*

*We consider regenerative heating air to a high temperature order of 800–1000 °C and possible intensification. We analyze the influence changes on a heat transfer properties of air depending on the pressure. Thermal aspect is evaluated for the creation of high-temperature heater according to the type of pulverized coal boiler for combined cycle gas unit.*

*Keywords: air, recuperative heating, high-temperature air heater, heat exchange intensification, combined-cycle power unit.*

В настоящее время возрастает интерес к использованию твердых топлив в энергетике. Это связано, во-первых, со значительным сокращением запасов природного газа и нефти, во-вторых, с достаточно высокой ценой этих энергоресурсов. Перспективным направлением является ПГУ на твердом топливе. В схеме гибридной ПГУ на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива одним из ключевых элементов является высокотемпературный воздухонагреватель, в нем нагревается сжатый воздух, направляемый затем в камеру сгорания газовой турбины.

В качестве основного конструктивного элемента рекуперативного устройства нагрева воздуха чаще всего используется трубный металлический элемент. Для описания интенсивности теплообмена к воздуху в таком элементе при турбулентном режиме течения существует много критериальных зависимостей, наиболее распространенные из них приведены ниже:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,021 Re_{дж}^{0,80} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_{с})^{0,25}, \quad (1)$$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,023 Pr_{ж}^{0,4} Re_{дж}^{0,80}. \quad (2)$$

Разница между ними составляет ~10 %.

Очевидно, что для данных зависимостей наибольшее влияние на теплообмен оказывает плотность жидкости пропорционально  $\rho^{0,8}$  (определяется  $T$  и  $p$ ) и ее скорость пропорционально  $w^{0,8}$ . Менее заметно теплоотдача зависит от  $\lambda^{0,57}$ ,  $c_p^{0,43}$ ,  $\mu^{-0,37}$ . Влияние геометрического размера канала на теплоотдачу также оказывается относительно слабым  $\alpha \sim d_{эк}^{-0,2}$ . Опираясь на (1), получим  $\alpha \sim p^{0,8}$  и  $\alpha \sim T^{-0,53}$ .

Для воздухонагревателя гибридной ПГУ основные параметры, влияющие на теплообмен, изменяются в следующих пределах: скорость потока – 10–25 м/с (согласно рекомендациям по проектированию воздухонагревателей), температура воздуха – 400–1000 °С, давление воздуха – 1,5–3 МПа, диаметр трубопровода – 30–150 мм. Расчет по зависимостям (1) и (2), что коэффициент теплоотдачи с изменением параметров теплообмена меняется в значительных пределах от 150 до 800 Вт/(м²·К), причем диапазон расширяется с ростом давления. При проектировании промышленных установок с факельным обогревом компромисс между  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  может быть достигнут путем подбора режимных параметров факела ( $\alpha_1$ ) и интенсификации внутреннего теплообмена ( $\alpha_2$ ).

Рекуперативный нагрев воздуха до высоких температур может быть произведен различными способами, из которых наиболее применимый в технике – факельный (либо нагрев высокотемпературными продуктами сгорания). В качестве альтернативной технологии можно привести разрабатываемые за рубежом приемники солнечной энергии [3], позволяющие использовать ее в различных установках, в том числе работающих по циклу Брайтона, где внутри ресивера протекает сжатый воздух, направляемый после подогрева до 800–1000 °С (в перспективе до 1500 °С) в камеру сгорания газовой турбины.

Рассмотрим нагрев воздуха от факела в топке энергетического котла. Интервал изменения температуры продуктов сгорания здесь лежит в пределах 1000–1900 °С, что соответствует  $\alpha_1$  в 120–300 Вт/(м²·К). В зависимости от давления воздуха (с известным набором параметров воздуха и геометрических параметров) существует граничное значение давления  $p_{гр}$ , условно разделяющее поле на две области:

- область преобладания внешнего теплообмена над внутренним ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ) при  $p < p_{гр}$ ;
- область преобладания внутреннего теплообмена над внешним ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) при  $p > p_{гр}$ .

Для указанных выше границ варьирования  $w$ ,  $t$  и  $d$  граничное давление изменяется в широком диапазоне от 0,2 до почти 5 МПа.



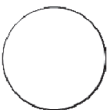
Основным ограничением при разработке устройств высокотемпературного нагрева воздуха является допустимая температура стенки рекуператора, который может быть изготовлен как из металла, так и из керамики. Металлические конструкции более устойчивы к динамическим нагрузкам и позволяют обеспечить лучшую газоплотность, в силу чего представляются предпочтительными. Наибольшей жаропрочностью обладают стали, легированные хромом, при содержании его 25–30 %. Максимальная температура для жаропрочных сталей достигает 1100–1200 °С. В газовых турбинах предельным уровнем температур металла рабочих лопаток, выполненных из жаропрочных сталей, считается 850–900 °С, однако они испытывают большие динамические нагрузки в отличие от трубных элементов воздухонагревателя. С учетом запаса была принята максимальная рабочая температура металла не более 1000 °С.

Для решения задачи интенсификации внутреннего теплообмена используется огромное количество конструкций, из которых применительно к задаче нагрева низконапорного воздуха до высоких (~800–1000 °С) температур был выбран способ с использованием стержневых вставок [4]. В результате

их применения увеличивается внутренняя поверхность теплообмена, нагрев которой идет за счет переизлучения от внутренней поверхности трубы на вставку. Эффективность способа повышается с ростом температуры греющей среды.

Моделирование в среде Ansys CFX 14.5 работы труб с различными внутренними вставками (таблица) при атмосферном давлении показало, что вставка в виде звезды-8 позволяет добиться уровня значений коэффициента теплоотдачи 120–150 Вт/(м<sup>2</sup>·К) (рисунок), достаточного для поддержания температуры стенки рекуператора ниже предельных значений при нагреве воздуха до 800 °С, что делает возможным использование подобных рекуператоров, например, в металлургических печах. Температура продуктов сгорания и воздуха на входе трубного элемента принималась 1400 °С и 450 °С соответственно, схема движения прямоток, длина трубного элемента 2 м.

Параметры трубных нагревательных элементов

Характеристика	Вид вставки		
	Звезда-8	Крест	Без вставки
Номер вставки	1	2	3
Вид трубного нагревательного элемента			
Внутренний диаметр трубы, м	0,1	0,1	0,076
Размеры вставки, м	Ширина пластин 0,1	Ширина пластин 0,1	—

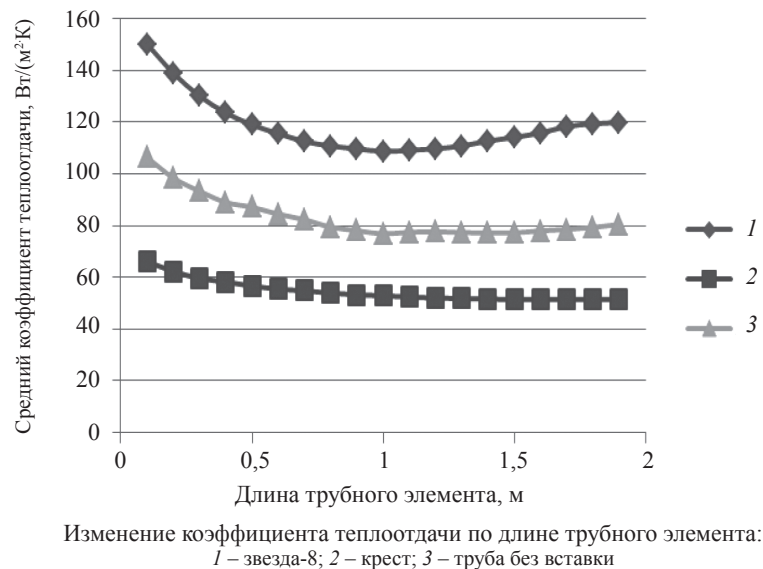
С помощью подбора профиля интенсифицирующей поверхности может быть уменьшено число пластин на стержневой вставке, и можно ожидать уменьшения негативного роста гидравлического сопротивления [5], однако данный вопрос требует дополнительной проработки с точки зрения изменения гидравлического сопротивления трубного элемента.

При разработке устройств высокотемпературного нагрева компримированного воздуха вопрос поддержания температуры стенки рекуператора в допустимых пределах стоит менее остро благодаря большим внутренним коэффициентам теплоотдачи.

В то же время задача повышения компактности агрегата требует интенсификации внешнего теплообмена до значений, соответствующих теплообмену внутри трубных нагревательных элементов.

Для интенсификации внешнего теплообмена существует несколько основных способов:

- 1. Повышение температуры факела за счет:
  - применения обогащенного кислородом дутья;
  - повышения сверх стандартной температуры подогрева низконапорного воздуха, подаваемого для сжигания угольной пыли в топку.



## 2. Повышение давления греющей среды.

По этому способу наиболее известными являются решения:

- В высоконапорном парогенераторе на Невинномысской ГРЭС (давление 0,6–1,2 МПа) и подобном котле на ТЭС Келлерман, работавшем на синтез-газе паровоздушной газификации угля. Методика расчета ПГУ с ВПП приведена в [6];
- В котле с топкой кипящего и циркулирующего кипящего слоя под давлением фирм ABB Carbon Foster Wheeler;
- В газоохладителе и газоподогревателе синтез-газа после газогенератора.

## 3. Увеличение наружной поверхности за счет оребрения.

Задача высокотемпературного нагрева компримированного воздуха решалась при разработке агрегата высокотемпературного нагрева воздуха для работы в схеме гибридной угольной ПГУ. Двухступенчатая подготовка рабочего тела для газовой турбины (нагретого воздуха) позволяет объединить в одной установке схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией и «внешним» сжиганием, заметно уменьшая присущие им в отдельности недостатки, что повышает энергетическую эффективность в целом.

В рассматриваемой схеме в качестве устройства высокотемпературного нагрева воздуха использован котел с типичной пылеугольной топкой, лишь с тем отличием, что в ее поверхности нагрева подается цикловый воздух под давлением, который после нагрева до 800–1000 °С направляется в камеру сгорания газовой турбины и догревается там до рабочей температуры за счет сжигания синтез-газа.

С учетом особенностей разрабатываемого агрегата интенсифицировать внешний теплообмен 2-м и 3-м способами достаточно сложно. Повышение давления продуктов сгорания целесообразно, если они после котла не выбрасываются в атмосферу, а поступают на вход газовой турбины, что оказалось малоэкономичным, в том числе в связи с проблемами с очисткой газов.

Развитие внешней поверхности с помощью различных ребер также затруднено из-за возможности заноса и шлакования поверхностей. Остается повышение температуры факела.

При увеличении температуры факела до предельных значений  $\sim 1900^\circ\text{C}$  разница между температурами факела и стенки –  $900^\circ\text{C}$ , а разница между температурами стенки и воздуха –  $200\text{--}600^\circ\text{C}$  (при температуре воздуха  $800\text{--}400^\circ\text{C}$ ). В результате, для обеспечения допустимой температуры металлической стенки трубы соотношение  $\alpha_1/\alpha_2$  должно быть  $1,5\text{--}4,5$ , а  $\alpha_2$  должно быть порядка  $600\text{--}1500\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , т.е. необходимо использовать переизлучающие вставки, что требует дальнейшей проработки.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

#### Список использованных источников

1. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Zhen Yang, Zhenxing Zhao, Yinhe Liu, Yongqiang Chang, Zidong Cao Convective heat transfer characteristics of high-pressure gas in heat exchanger with membrane helical coils and membrane serpentine tubes // *Experimental Thermal and Fluid Science* 35 (2011). – P. 1427–1434.
3. Clifford K. Ho, Brian D. Iverson Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014). – P. 835–846.
4. Интенсификация высокотемпературного теплообмена путем установки вторичных излучателей в трубах / Б.С. Сорока, П. Шандор, К.Е. Пьяных, А.В. Педоренко // *Промышленная теплотехника*. – 2003. № 4. – С. 349–352.
5. Исаев С.А., Лысенко Д.А. Численный анализ турбулентного теплообмена в прямоугольном канале с круговой цилиндрической траншеей в рамках полуэмпирических моделей и модели крупных вихрей // *Тр. 4-й Российской национальной конф. по теплообмену*. – М.: Изд. дом МЭИ, 2006. Т. 1. С. 127–130.
6. Установки парогазовые стационарные. Методика расчета тепловых схем установок и высоконапорных парогенераторов. РТМ 108.020.22–84.
7. О предпроектной проработке гибридной угольной ПГУ с воздушнонагревателем / Гордеев С.И., Богатова Т.Ф., Рыжков А.Ф. и др. // *Электрические станции*. – 2012. № 10. – С. 17–21.
8. Клер А.М., Тюрина Э.А., Медников А.С. Угольная парогазовая установка с нагревом рабочего тела газотурбинного цикла в регенеративных теплообменниках периодического действия // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 75–80.